

【新発想型（一般）】

機械学習による未整備エネルギー領域
での核分裂核データ構築と炉物理への
影響評価

東京科学大学 石塚 知香子

電気通信大学 植野 真臣

日本原子力研究開発機構 岩本 修

大阪大学 竹田 敏



研究背景

現状の核分裂収率データにはどんな問題があるか？

- 既存の評価済み核データライブラリでは核分裂収率情報は $En=2.53 \times 10^{-8}, 0.5, 14.0(MeV)の三つのみ$
- 従来手法の3つのエネルギー点の線形内挿が適切でない事例の発見
- 実験で実現できる単色中性子源は限定的

もし FPY(E) がズれるとどんな影響があるか？

- 制御棒の効き方が変わる
- 反応度事故の評価が変わる
- 臨界安全性の判断が変わる

特に MA (Am, Cm) 燃料では ν_d データが少なく、
MAの ν_d が重要な高速炉や ADS の安全評価は FPY(E) に敏感

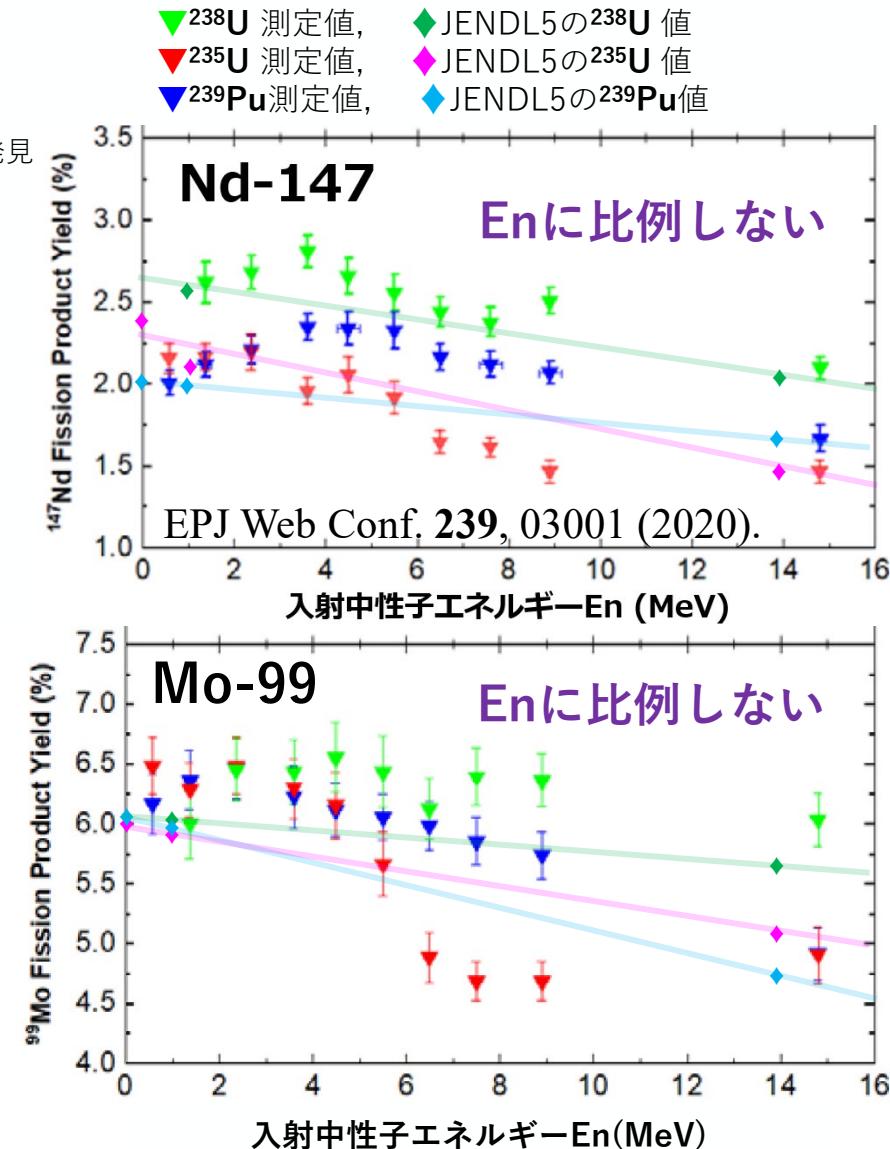
核種によって崩壊の仕方 (β 崩壊・ γ 発生量) が大きく違うため、FPY が 5–7% 変わるだけで、崩壊熱は 8–15% 変わる

崩壊熱は停止後の炉心冷却、燃料損傷のリスク、格納容器の設計に直接関わるため、数%でも無視できない。

β , γ の量は FP の種類と量に依存するため、

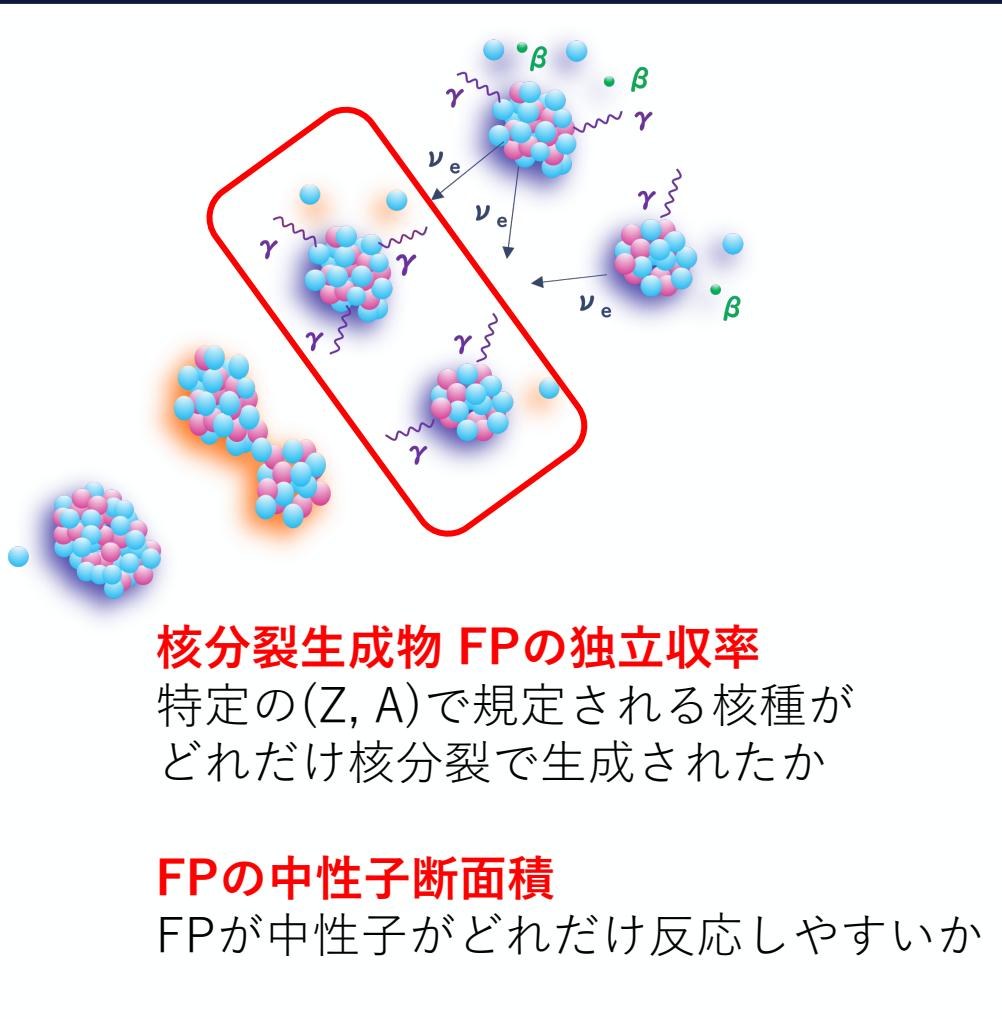
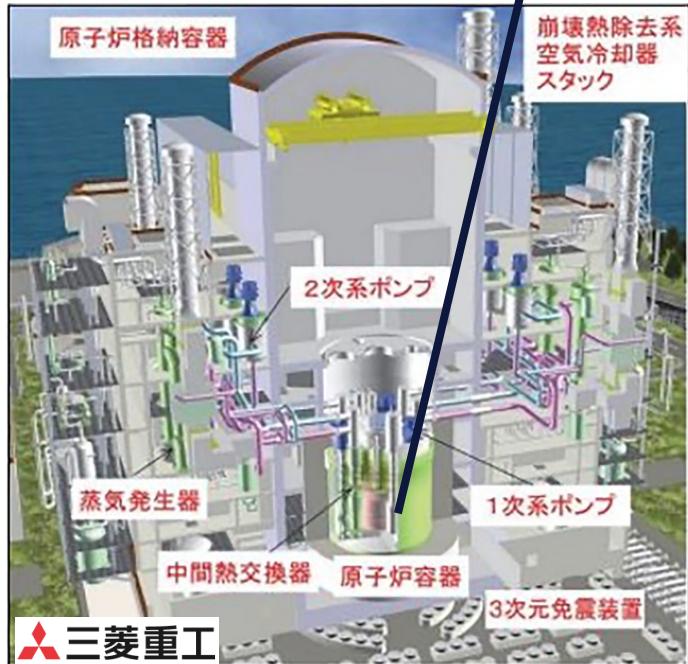
- 事故時の放射線量
- 格納容器や遮蔽の設計
- 再処理施設・輸送安全評価

などが変わってしまう。



本課題の全体像

機械学習で高度化を試みる核分裂核データ



核分裂核データのエネルギー依存性が炉心特性や使用済み燃料に与える影響を検証

本課題の全体像

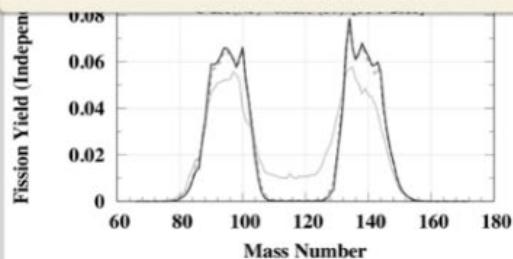
ベイズ深層学習による未整備核データの高精度予測

電通大（植野）

核分裂収率や核分裂生成物の中性子断面積の予測
に適したベイズ深層学習のアルゴリズム考案

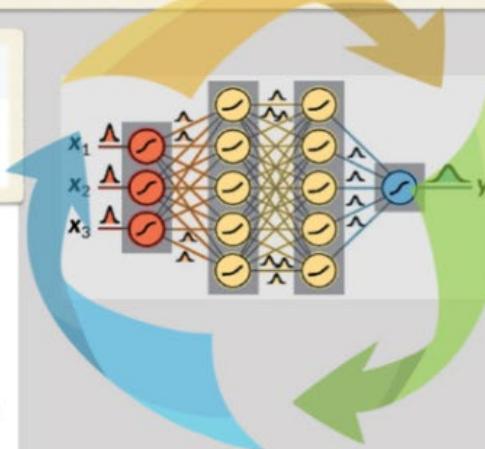
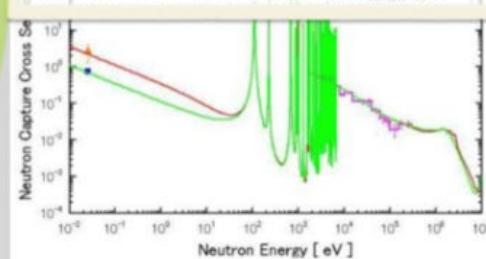
東工大（石塚・千葉）

未整備エネルギー領域における
核分裂収率の高精度予測



JAEA（湊・岩本）

核分裂生成物に対する
中性子断面積の高精度予測



炉物理への影響評価



阪大（竹田・北田）

ORIGENおよびMVPによる高速炉および軽水炉での
 • 実効核分裂生成物量評価
 • 核分裂生成物の中性子断面積の更新に対する影響評価

研究サブテーマ一覧

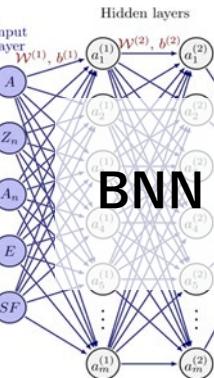
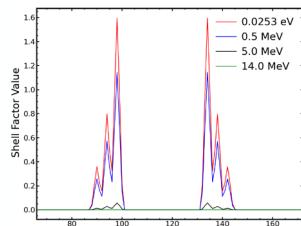
全サブテーマ、計画通り、ないしは計画以上に進展した

サブテーマ	研究項目
テーマ① 東工大	機械学習による核分裂収率予測と評価 BNNを用いたFPYのエネルギー依存性予測
テーマ② 電通大	核分裂収率評価のためのベイジアンニューラルネットワークの高度化 BNNに留まらず、NNの専門家の観点でアルゴリズム開発
テーマ③ JAEA	機械学習による中性子断面積評価 機械学習と核物理の融合による核反応モデルCCONEのモデルパラメータの高度化とFPの中性子断面積予測
テーマ④ 阪大	炉物理への影響評価 ①ADSや新型炉における炉心特性への影響評価 ②種々の燃料サイクルを想定したバックエンドへの影響評価

査読付き国際論文： 1件出版済み、2件査読中、1件投稿準備中
 発表：18件

BNNを用いた核分裂収率のエネルギー依存性予測手法の開発 テーマ①

*殻効果因子の導入

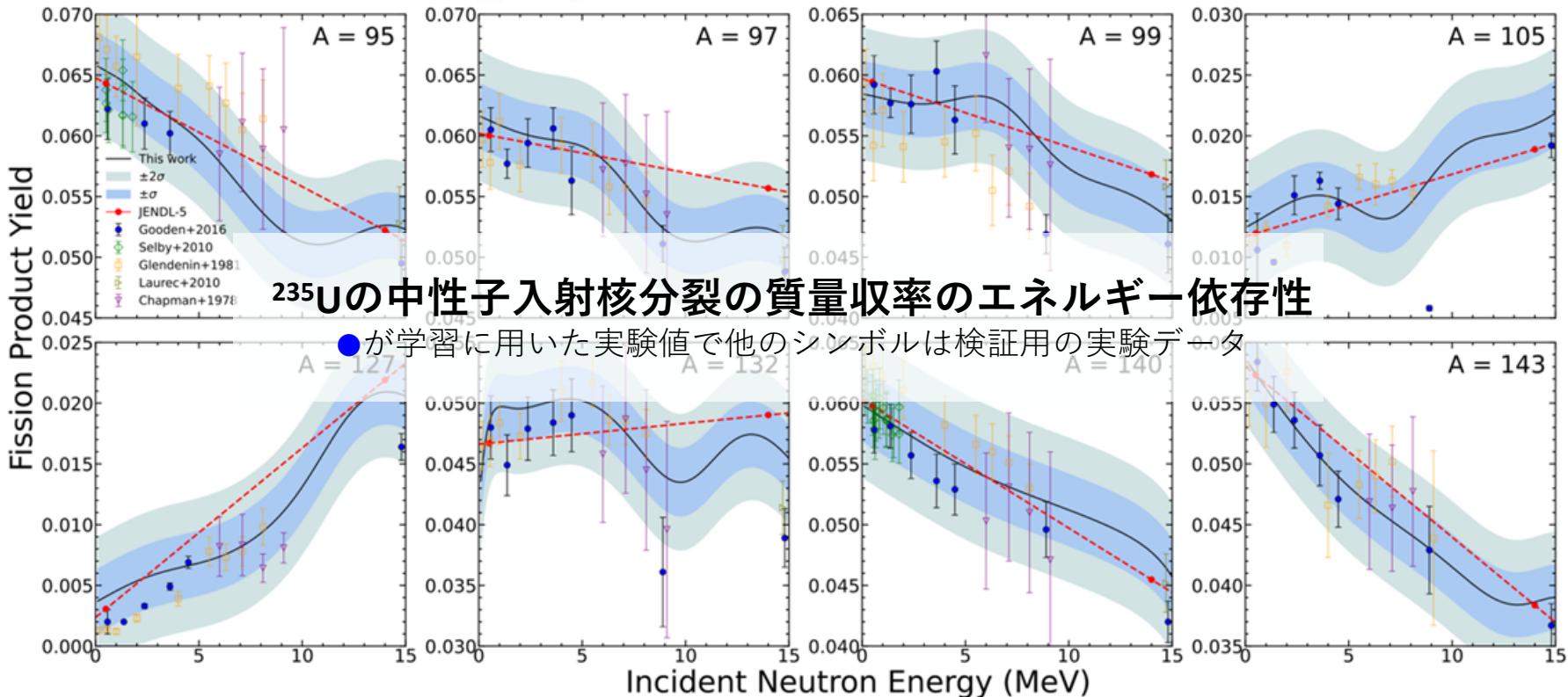
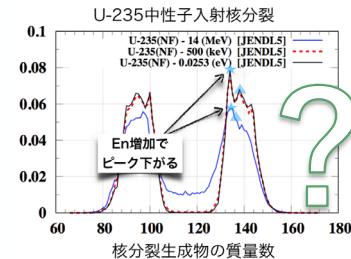


+

渡邊-赤池情報量指標による
妥当なパラメータ探索

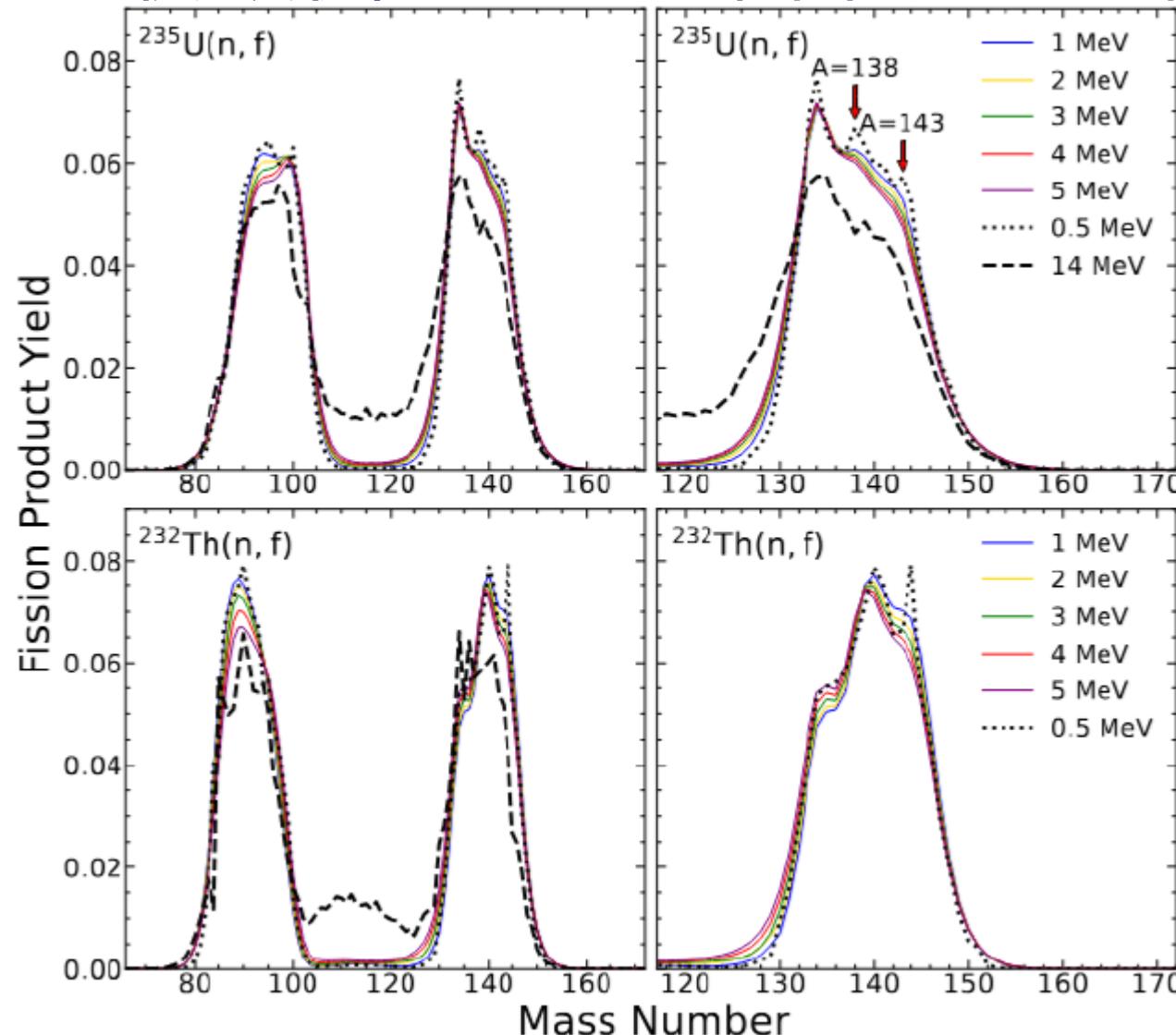
*J. Chen et al., J. Nucl. Sci. Tech. (2024), published.

Elsevier Japanの注目論文としてXで紹介



赤色の線形内挿に比べてエネルギー依存性予測が実測値と全体的に良く一致

BNNを用いた核分裂収率のエネルギー依存性予測手法の開発 テーマ①



収率予測では二重閉殻 $A=50$, 132近傍や変形閉殻 $A=140-144$ で
物理的に妥当な挙動が得られた

質量収率から独立収率の導出 $Y(A) \rightarrow Y(Z, A, m)$ へ

予測された $Y(A)$ 分布を $Y(A, Z, m)$ 分布に変更した時に、その奇偶効果を導入する。導入方法として東工大が開発した式を利用する。 K. Tsubakihara et al., JNST 58, 151 (2021).

$$Y_1(Z, A, m) = \textcircled{Y_1(A)} \times Y_A(Z) \times F_{\text{oe}} \times B_{Z,A}^{\text{HF}}(m),$$

機械学習の結果と物理モデルを組み合わせて独立収率を導出

$$Y_A(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(A)} \int_{-0.5}^{0.5} \exp\left[-\frac{(Z - Z_p(A) + t)^2}{2\sigma(A)^2}\right] dt,$$

$$F_{\text{oe}} = \exp\left[-\frac{\Delta E_{\text{sh}}(Z, A)}{E_d(A)}\right] \quad E_{\text{pair}} = \begin{cases} 12/\sqrt{A} & (\text{odd - odd nucleus}) \\ -12/\sqrt{A} & (\text{even - even nucleus}) \\ 0 & (\text{otherwise}). \end{cases}$$

全独立収率の妥当性評価は積分値である遅発中性子収率によって評価

総和計算による遅発ちゅせいし収率の求め方は下記のとおり

遅発中性子数の平均 および
時間 t での遅発中性子放出数

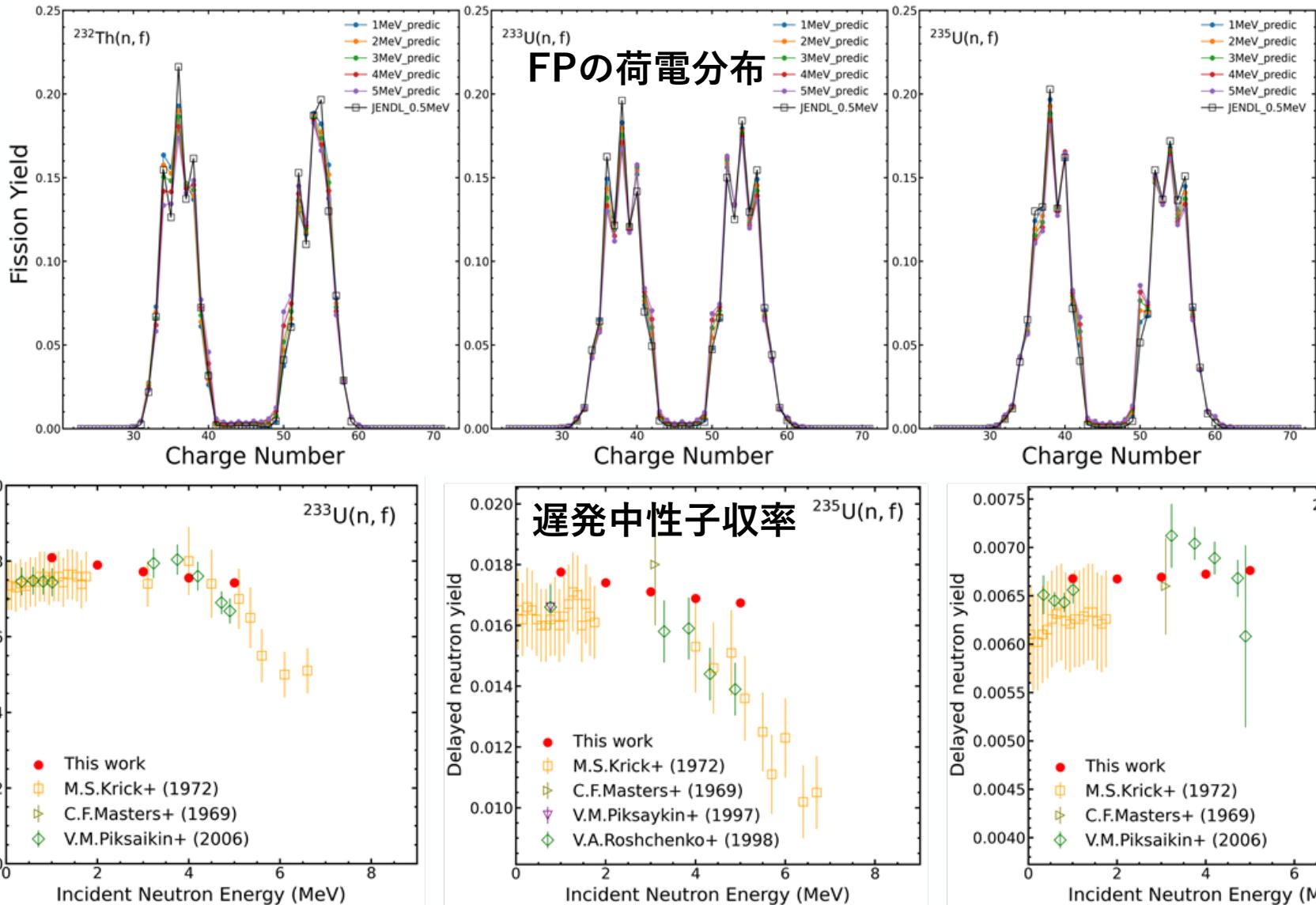
$$\bar{v}_d = \sum_i^{\text{allFP}} Y_i P_{ni}$$

$$n_d(t) = \sum_i^{\text{allFP}} Y_i P_{ni} \lambda_i \exp(-\lambda_i t) + (\text{decay chain effect})$$

ただし Y_i は累積収率, P_{ni} は遅発中性子放出確率, (分岐比) λ_i は崩壊定数

※累積収率は核分裂片(A', Z)が v_p, v_d 放出後の自分自身の生成確率と (A, Z) の全先行核の独立収率の総和
ここで $A' = A + v_p + v_d$

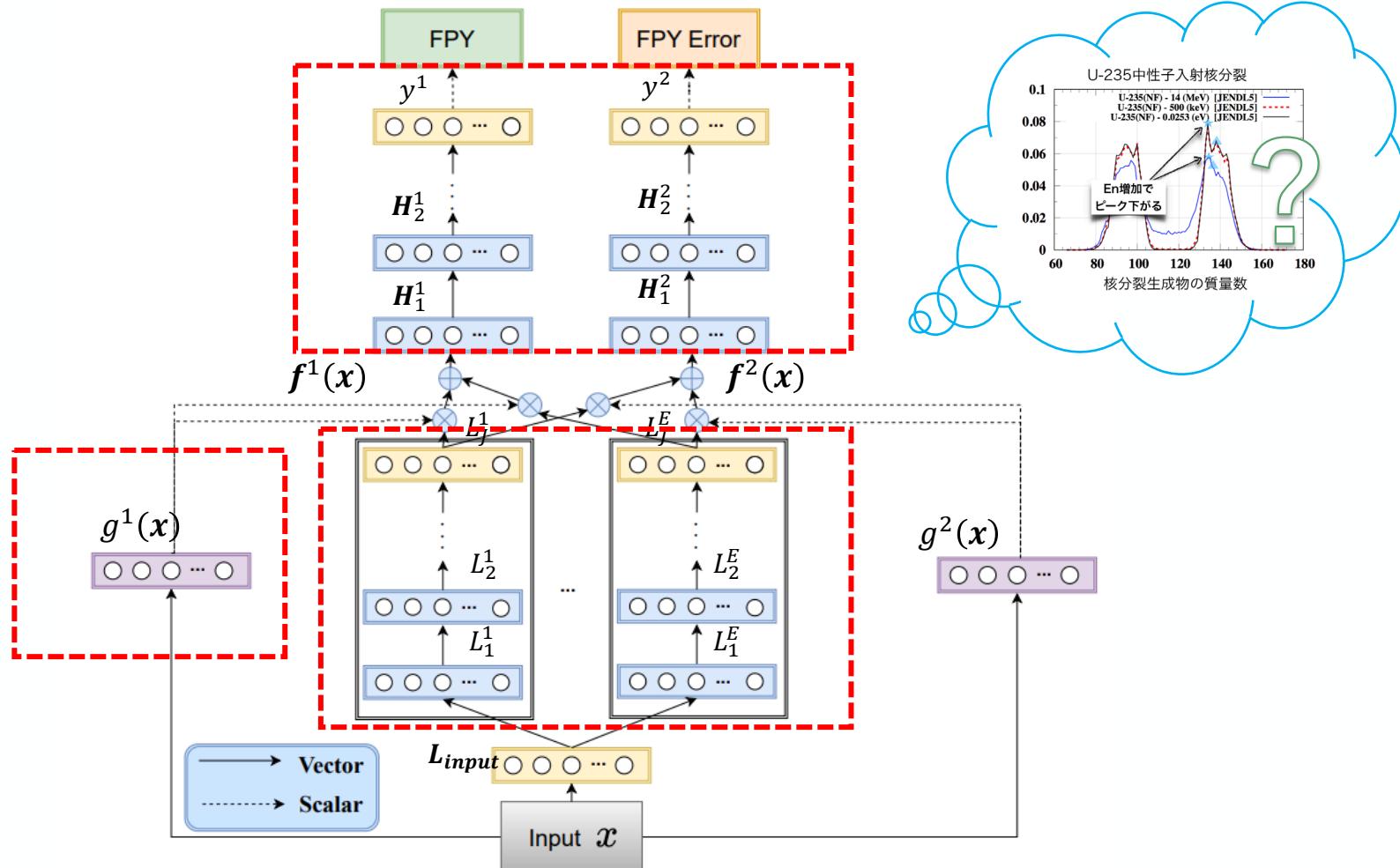
BNNを用いた核分裂収率のエネルギー依存性予測手法の開発 テーマ①



実験値のないMAの遅発中性子収率も5MeV以下は信頼できる予測値を提供可能

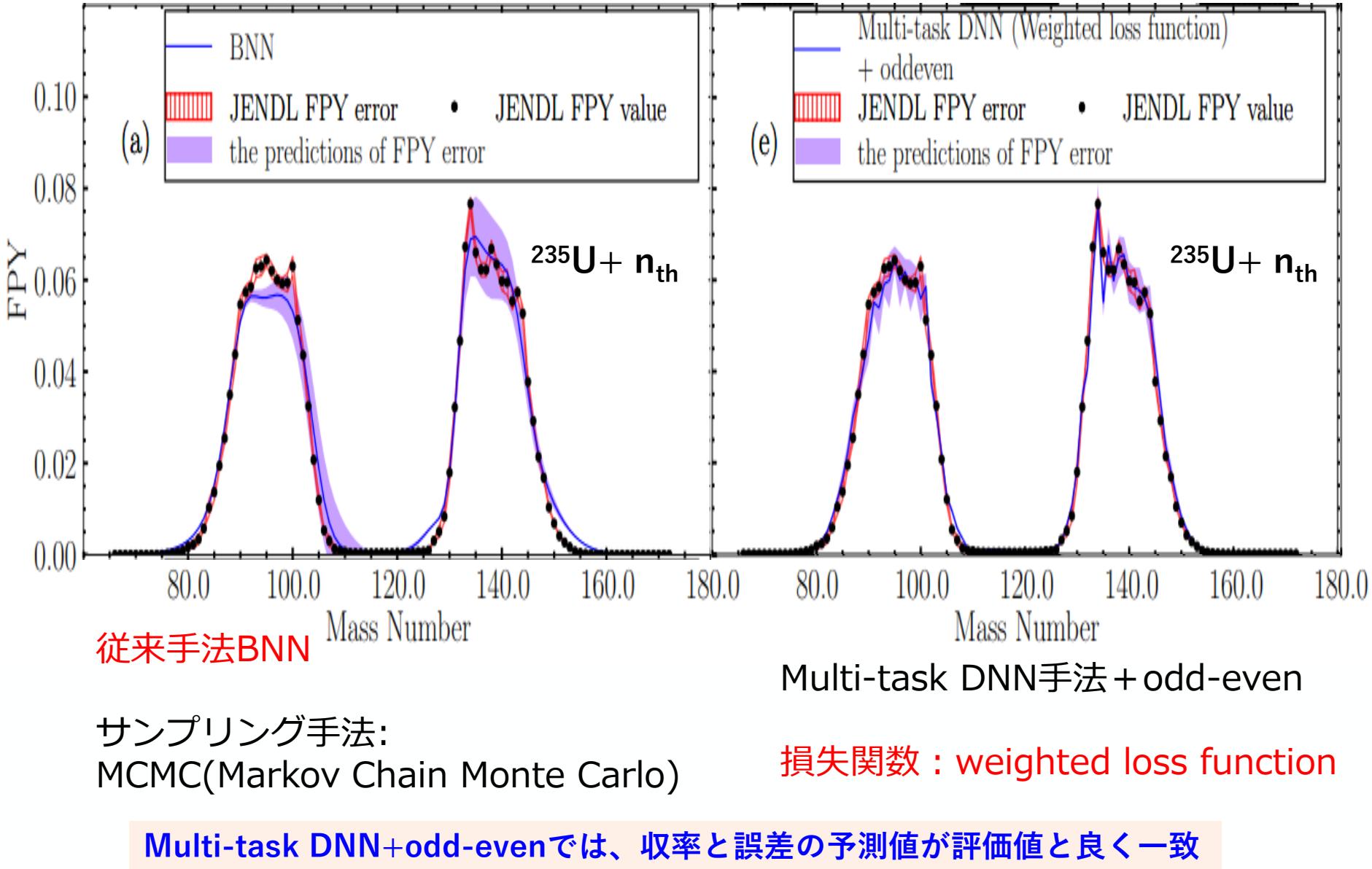
BNNに代わる核分裂収率のエネルギー依存性予測モデルの開発

誤差を信用区間で与えるBNNに代わり、**マルチタスクDNNモデル**にすることで評価値や実験値に加え、誤差の情報も学習し、FPYと誤差の同時予測が可能。



このモデルでは、FPYと誤差の予測タスクの依存関係を学習することで、各タスクの予測精度を向上できる

BNNに代わる核分裂収率のエネルギー依存性予測モデルの開発

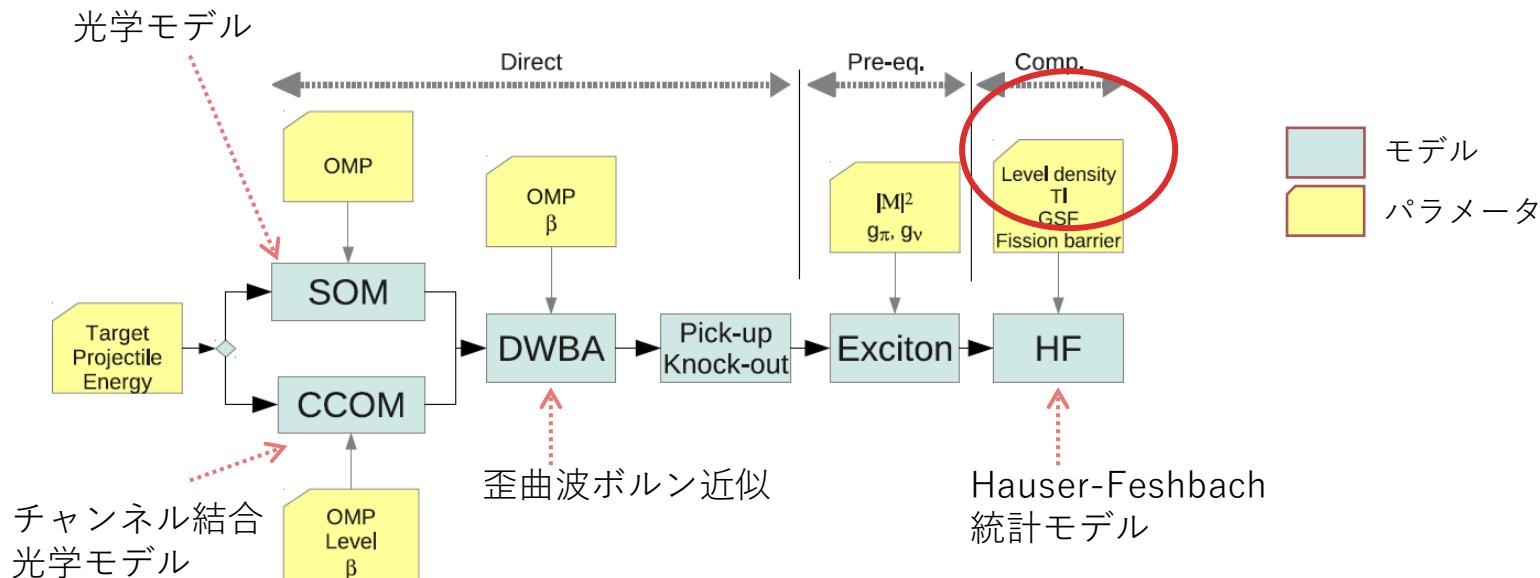


ガウス過程回帰を用いたFPの中性子断面積予測の高度化

サブテーマの内容

- 核分裂生成物の測定データは不十分
- 中性子核反応モデル計算に機械学習を導入し、核分裂生成物の中性子断面積を予測
- 得られた結果は評価ファイルとして整備し、炉物理への影響評価へ提供

核反応モデル計算コードCCONE (JAEAで開発し核データライブラリJENDLの整備に利用)



- FPの断面積として重要な、中性子捕獲反応に着目
- ガンマ線放出過程に重要なガンマ線強度関数の改良を実施

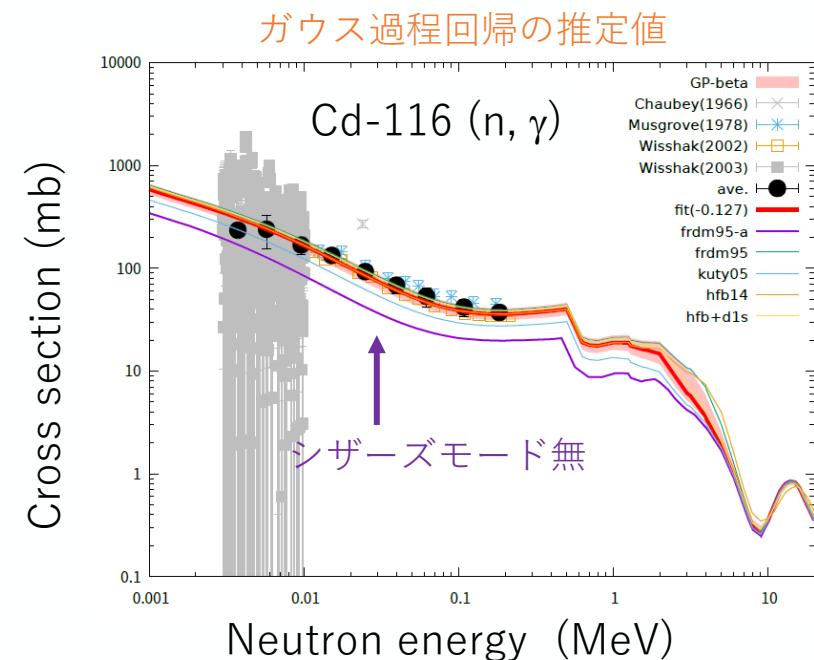
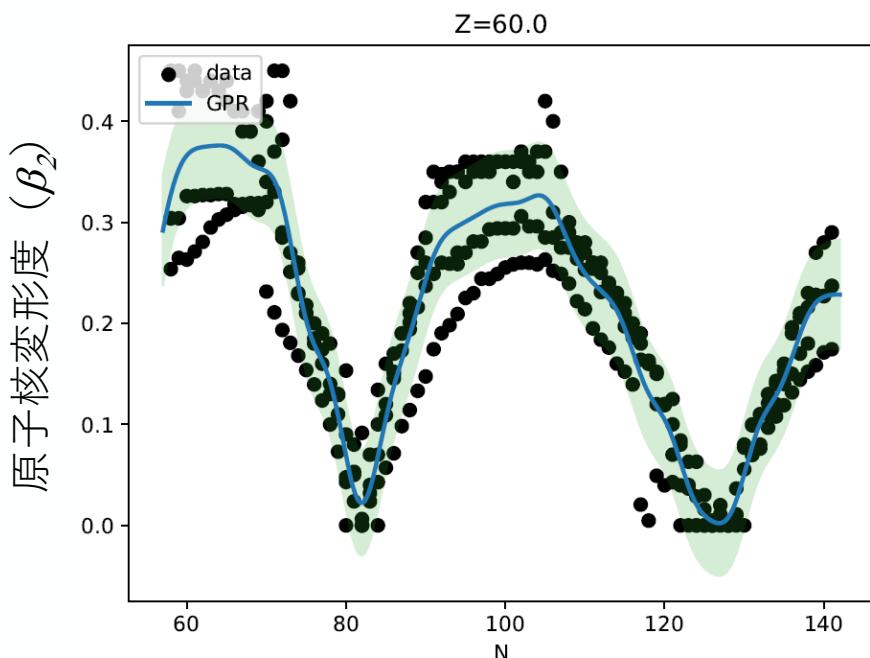
ガウス過程回帰を用いたFPの中性子断面積予測の高度化

テーマ③

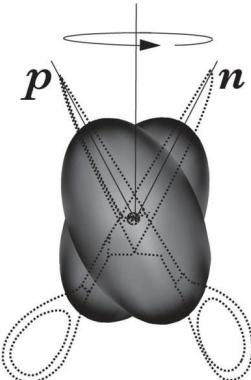
ガンマ線放出には原子核の変形が影響

Mumpower等 (Phys. Rev. C96, 024617 (2017)) の物理モデル (シザーズモード) を新たに導入

原子核の変形度 (β_2) を理論計算 (FRDM95, HFB+D1S, HFB14, KUTY05) 及びガンマ遷移強度 (換算値) から、ガウス過程回帰 (変数: 陽子数Z, 中性子数N) を用いて推定



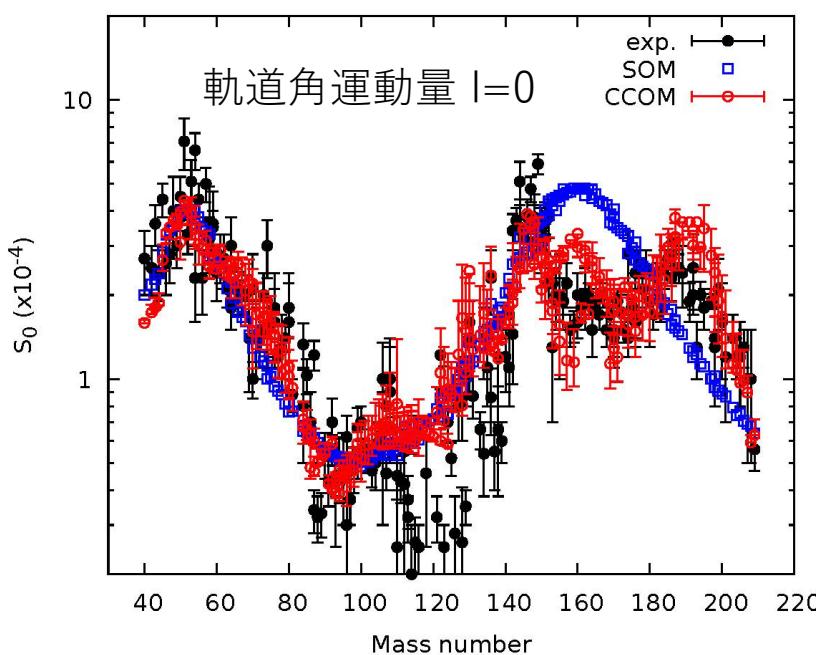
シザーズモードを取り入れることで
断面積の予測精度が全体的に向上



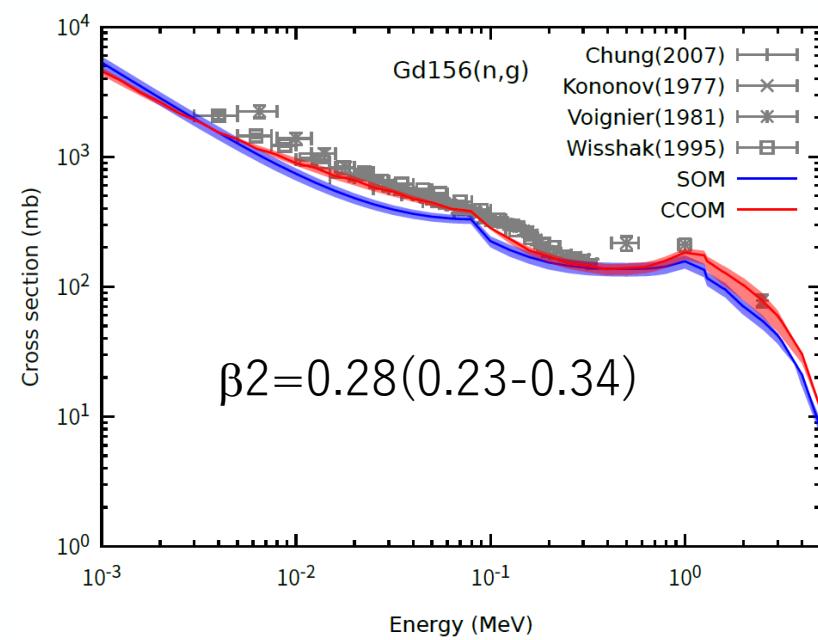
中性子の入射チャンネルも原子核の変形が影響

変形による原子核の回転効果を取り入れた計算（チャンネル結合法CCOM）を実施。
球形モデル（SOM）と比較

中性子強度関数（中性子の吸収されやすさ）



中性子捕獲断面積



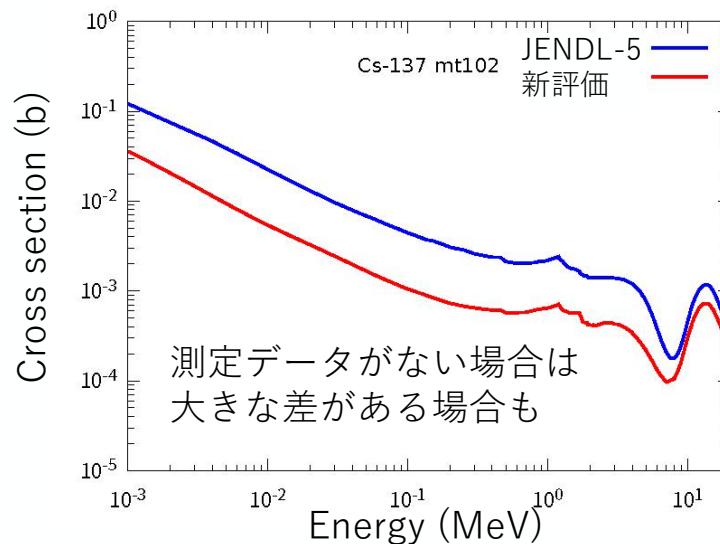
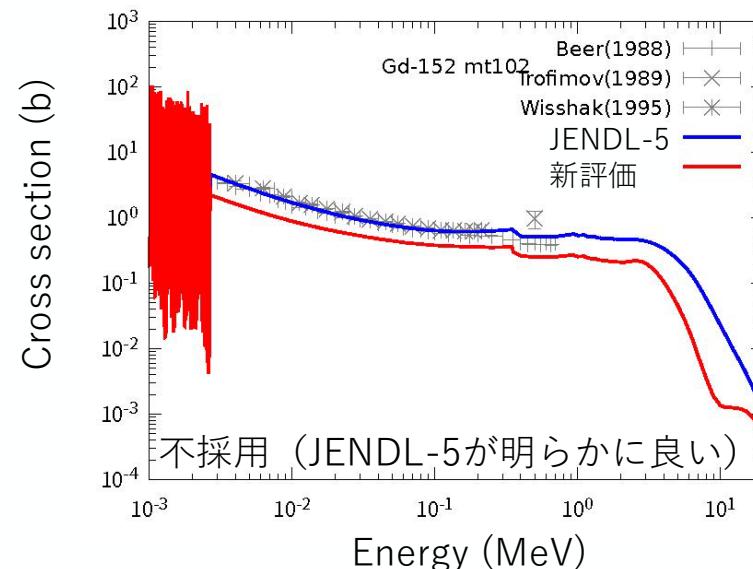
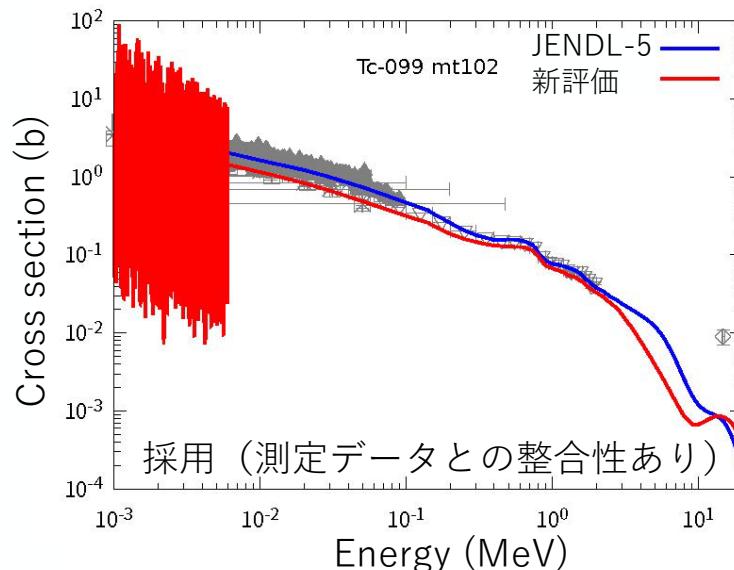
変形を取り入れたモデルの方が全体的に良く一致

機械学習で高度化された核分裂核データの炉物理への影響評価

テーマ③

新評価ファイルを作成

- 開発した手法を用いて、FPの断面積を系統的に評価
- 測定データと比較し、JENDL-5の方が明らかに良い場合はJENDL-5を採用



最終核データファイル

- JENDL-5の核分裂生成物：
419核種 ($A=66-172$)
- 高速中性子の捕獲断面積に新評価採用：
384核種
- JENDL-5のまま：35核種

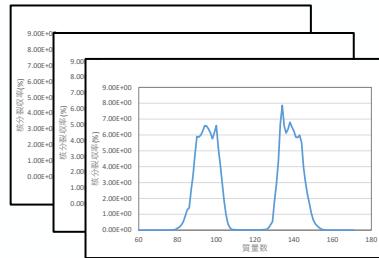
MVPライブラリを作成し、炉物理影響評価へ提供

機械学習で高度化された核分裂核データの炉物理への影響評価

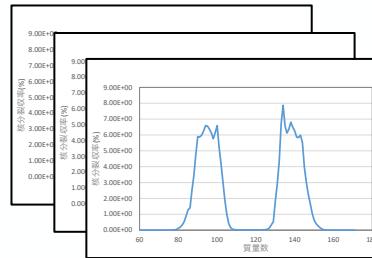
- ①ADSや新型炉における炉心特性への影響評価
- ②種々の燃料サイクルを想定したバックエンドへの影響評価

新たに整備された1, 2,..MeVの収率情報

U235

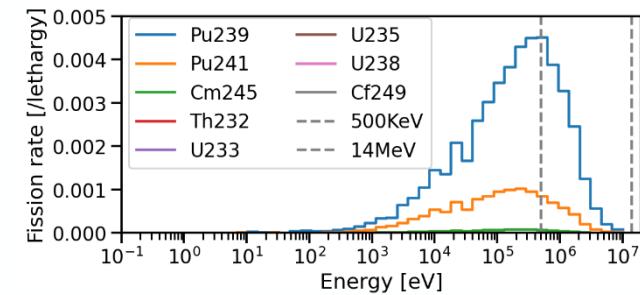


Pu239



...

MVPで得られる核分裂率スペクトル



従来の収率(JENDL-5)を用いたORIGENライブラリ

新たな収率(JENDL-5+新収率)を用いたORIGENライブラリ



従来収率ベースの評価結果

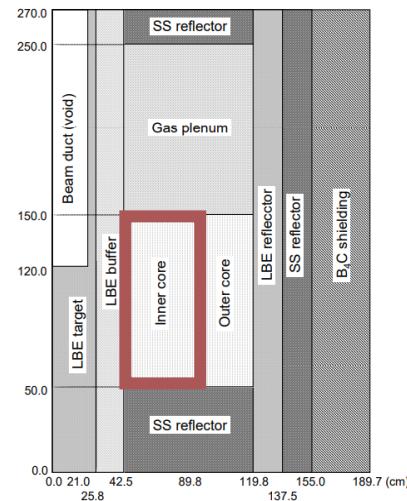
ADS、新型炉における崩壊熱等の比較



作成したORIGENライブラリに基づく評価結果

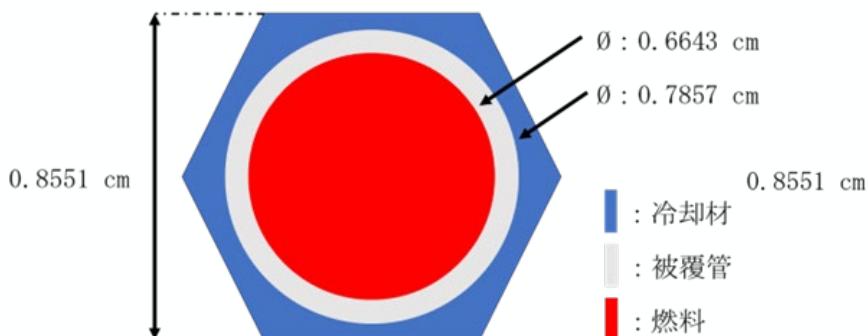
機械学習で高度化された核分裂核データの炉物理への影響評価 ～評価体系～

- ADSベンチマーク(Inner core)[1, 2]

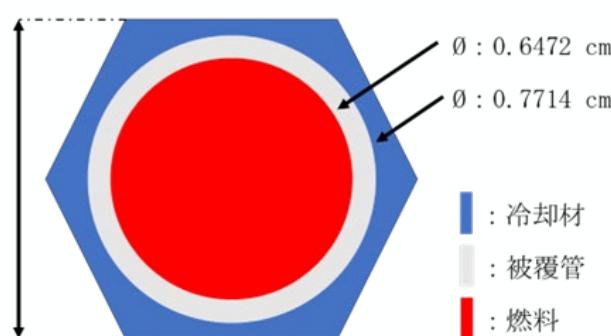


[1] T. Sugawara, et al.,
Accelerator-Driven System Analysis by Using Different Nuclear Data Libraries
[2] K. Tsujimoto, et al., J. Nucl. Sci. Technol. 41 (2004) 21.

- NEAで検討されているベンチマーク炉心[3]のピンセル体系



酸化物燃料



金属燃料

[3] NEA, "Benchmark for Neutronic Analysis of Sodium-cooled Fast Reactor Cores with Various Fuel Types and Core Sizes", Paris (2015).

機械学習で高度化された核分裂核データの炉物理への影響評価テーマ④ ～炉心特性への影響～

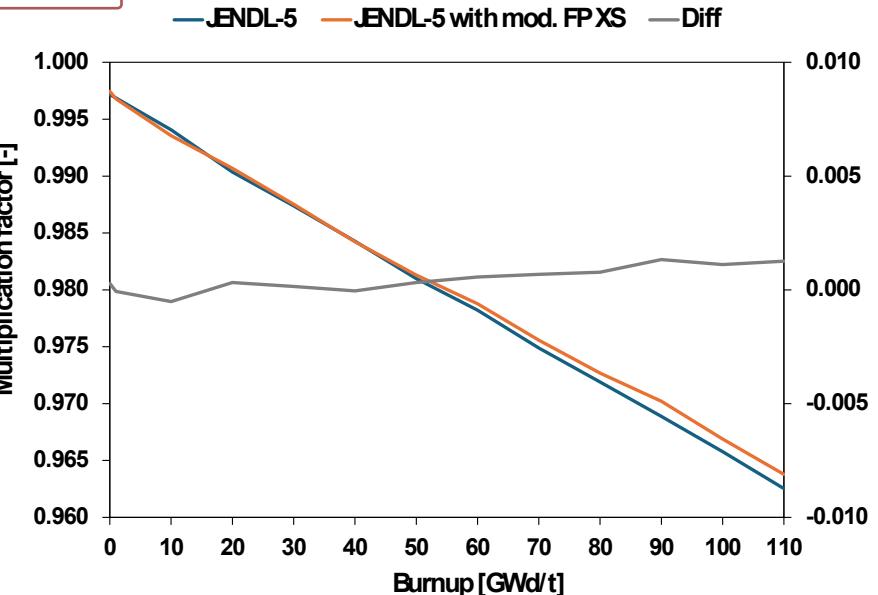
増倍率への影響

- 核分裂収率の更新による影響は限定的 (0.05%未満)
- 中性子断面積の更新による影響**は0.5%程度以下。ADSの体系では、Zr-94 断面積更新による捕獲率の増加と、Zr-92 および Tc-99 等の断面積更新による捕獲率の減少が一部打ち消されている。

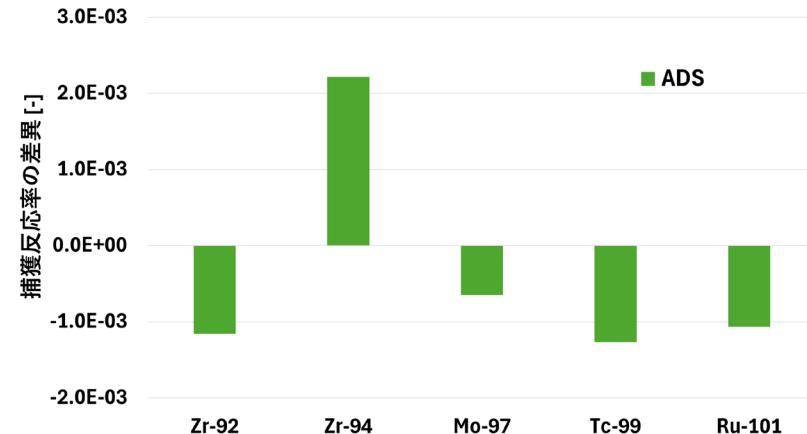
遅発中性子割合

- 核分裂収率の更新による実効遅発中性子割合への影響は2.6%以下であり、限定的であった。ただし、keepinの6群構造では、一部の群においては5%を超える影響を確認。

ADS



断面積の更新による増倍率への影響



燃焼末期における捕獲反応率への影響

Zr-94等の一部の核種については断面積の更新による有意な影響があることを明らかにした。

機械学習で高度化された核分裂核データの炉物理への影響評価 ～バックエンドへの影響～

FPの崩壊熱：100年程度までは5%以下の影響

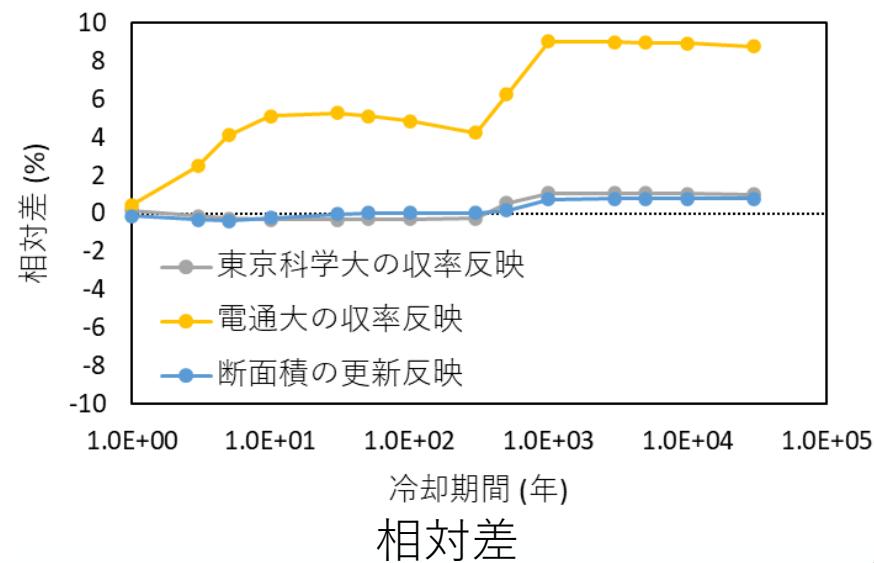
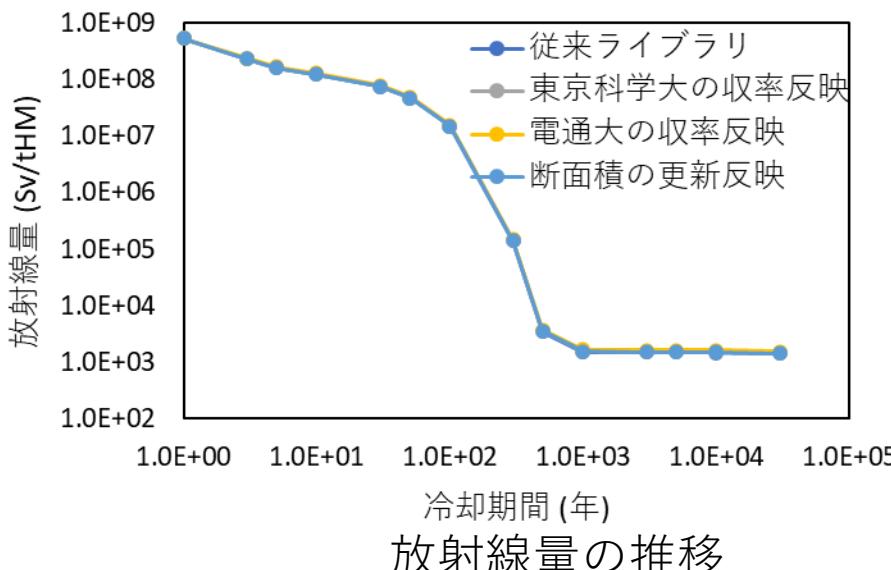
FPの放射線量：100年程度までは6%以下の影響

燃焼度の指標となる核種の生成量：

電通大の収率を用いた場合に、Sr-90(半減期28.8年)の生成量が10%程度大きい

- Nd-148：核分裂収率・断面積の更新の影響は5%以下
- Cs-137：核分裂収率・断面積の更新の影響は2%以下
- Cs-134：電通大の収率を用いた場合は約8%減、断面積を更新した場合は約15%減(Cs-133断面積の更新の影響)

酸化物燃料の放射線量



Sr-90やCs-134等の一部の核種については有意な影響があることを明らかにした。

最終成果物

テーマ① BNNによるエネルギー依存核分裂収率ファイルおよび遅発中性子収率ファイル

- 独立収率ファイル： ^{232}Th , ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu に対して $E_n=1,2,3,4,5\text{MeV}$ で整備
- 遅発中性子収率ファイル： ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu ※他の核種もいつでも出力可能

テーマ② FPYと誤差の同時予測が可能なMulti-taskモデルによるエネルギー依存核分裂収率ファイル

- 独立収率ファイル： ^{232}Th , ^{233}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu に対して $E_n=1,2,3,4,5\text{MeV}$ で整備

テーマ③ 核分裂生成物の中性子断面積についての新評価ファイルおよびMVPライブラリ

- JENDL-5の核分裂生成物（419核種： $A=66-172$ ）
- 高速中性子の捕獲断面積に新評価採用（384核種）
- 35核種はJENDL-5のまま

テーマ④ 核分裂収率および断面積データを、炉心特性からバックエンド評価（崩壊熱・放射線量・FP生成量）まで一貫して反映できる解析環境

- 多くのパラメータ値については影響が数%以下と限定的
- 一部の核種(^{134}Cs や ^{90}Sr)については生成量への影響が10%程度以上生じることが判明

本研究で開発した機械学習により高度化された核分裂核データによって、
予測精度向上に向けてADS・高速炉における照射後試験データの拡充が重要
であることが定量的に示された。

まとめ

研究目的

機械学習の手法による核分裂核データ（FPYと中性子断面積）の高度化
高度化された核分裂核データの炉物理影響への評価

原子力業界への波及

機械学習の手法により核分裂核データを高度化した結果、既存実験データが比較的整っている核種であっても¹³⁴Csおよび⁹⁰Sr等の生成量に顕著な影響がみられた。このことから、より信頼できる新しい原子力システム実現のためには照射後試験などの積分実験データの拡充が不可欠である。また、不確かさの大きい核種もあり、核データの不確かさを含めた評価が必要である。

国際展開への波及

核分裂収率のエネルギー依存性に関する核データ整備は2000年後半からの核データ業界の重要課題であり、世界的には2011年から米国で継続的な測定実験が続いている他、現象論的コードに基づくライブラリ整備が進んでいる。国際会議発表の場や投稿中の論文原稿公開直後にコンタクトをいただく等、海外の研究グループからの強い関心を示されている。

本課題の成果の社会的意義

本課題で新たに整備した核分裂核データは、今後提案されるSMR等、従来の中性子エネルギースペクトルと異なる新たな炉の効率的な核設計や核変換だけでなく、ニュートリノを用いた原子炉監視などの核セキュリティにも直接影響する。今回の成果により、積分データの拡充を進めることや核データの不確かさを含めた評価の整備の重要性が明らかになった。本成果は新たな原子力の研究開発の詳細な検討に資するものである。

ご清聴ありがとうございました